专题：海洋观测探测与安全保障技术
Ocean Observation and Security Assurance Technology

引用格式：彭子龙, 阎述学, 殷建平, 等. 水下观探测装备核供能方案的思考. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 888-897.
Peng Z L, Yan S X, Yin J P, et al. Thinking on nuclear energy supply scheme for underwater observation and exploration equipment. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 888-897. (in Chinese)

水下观探测装备核供能方案的思考

彭子龙[1*]　阎述学[2]　殷建平[3]　杨　磊[4]　蔡翔舟[5]　郁　杰[6]

1 中国科学院赣江创新研究院　赣州　341119
2 中国科学院沈阳自动化研究所　沈阳　110169
3 中国科学院南海海洋研究所　广州　510301
4 中国科学院近代物理研究所　兰州　730000
5 中国科学院上海应用物理研究所　上海　201800
6 中国科学院合肥物质科学研究院　合肥　230031

摘要　海洋事关国家战略利益，事关全人类共同命运，急需发展全方位、多维度地观测、探测海洋的各类装备。文章简要介绍了核能应用于水下观探测装备供能的2种技术途径及各类热电转换技术，定性归纳了核供能对各类型装备的适用性，分析了其中的核安全相关问题，并建议重点支持放射性同位素制备与分离技术研究与平台建设、个性化特种反应堆研发与共性平台建设、热电转换技术研究及相关核安全问题研究。

关键词　海洋，观探测装备，核能，核安全

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220524001

海洋是生命的摇篮，资源的宝藏，风雨的温床，贸易的通道，国防的屏障。海洋作为地球系统的重要组成部分，是全球气候变化和生态环境变化的主要驱动力。海洋关乎绝大多数国家的国家安全及油气、矿产等重大资源权益，更关乎世界和平、全球气候变化、人类生存与发展等全人类共同面临的前途命运问题。

遗憾的是，人类对海洋的认知还远远不能满足应对上述重大问题的需要。作为海洋大国，我国拥有约1.8万公里的海岸线，近300万平方公里的蓝色国土。近年来，我国在海洋领域的科技水平得到了较快提升，但与海洋强国相比整体上还有很大差距，急需高水平科技创新的支撑保障，以满足经济社会发展和国家安全的重大需求。在2021年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中，“积极拓展海洋经济发展空间”单列一章，并明确提出“培育壮大海洋工程装备”“加强深海战略性资源和生物多样性调查评价”“推动构

*通信作者
修改稿收到日期：2022年6月28日

建海洋命运共同体”。

1 长时稳定供能是海洋水下观探测装备的核心挑战之一

认知海洋，就必须深入海洋。人类目前正处在无人与载人装备观探测并行快速发展的阶段，未来必将走向深/远海载人驻留观测——通过建设深海原位实验室甚至海底城市，开展“更广、更深、更精、更久”的接触或原位观测与研究。得益于21世纪以来材料、能源、导航定位等技术的不断发展，海洋原位观测与现场实验的技术和装备研发正不断取得突破；但是，受海水介质的密度等内禀性质约束，时至今日海洋仍然是人类对自身所生活星球认知中的短板之一。

海洋水下观探测装备通常是一个有限空间、有限重量的耐压密闭体，除了直接面临着压力（每增加10米深度即增加约1个大气压）、腐蚀（包括海水和海洋生物腐蚀）、通信（高度依赖声波）等特殊环境困难外，其能源系统不仅须满足可靠性、安全性、耐低温、抗震动等条件，还受到体积和重量的强约束，由此也制约了装备的有效观测时长。

具体而言，① 对于小型水下移动装备（如水下滑翔机、Argo浮标、长航程AUV等[①]），其能源需求以能量型为主，其能源系统不要求瞬间大功率，但需要较高能量密度，可长期稳定安全使用；② 对于需要长期值守的水下固定装备（如潜标），一般采用一次性电池作为其能源来源，其能源系统需要长寿命周期和高可靠性；③ 对于需要高速机动的水下装备，由于要满足推进器等大功率机构的用电需求，其能源需求以功率型为主，其能源系统需要能够提供持续的大电流输出；④ 对于载人潜器，其能源需求主要以安全性为主。图1和2总结了各种海洋水下装备的供能功率需求和各种能源的适用范围[1]。

目前，绝大多数水下观探测装备使用电池（各类的一次/二次电池、燃料电池）供能[2,3]，其中一次/二次电池的比能量密度普遍在230 Wh·kg^{-1}以下：用于载人潜器的最大生命支持时间不超过143 h（法国的“鹦鹉螺号”）；用于UUV的续航力普遍在20—30 h@2—3 kn[②]；用于水下滑翔机或Argo浮标时的比能量密度可显著提高（不超过400 Wh·kg^{-1}），并且水下滑翔机（如我国的“海翼1000”、美国的SLOCUM G3[③]）续航力可达90—120天，Argo浮标（如美国的APEX BioGeoChem[④]）续航力则可达4年。燃料电池的比能量密度可大幅提高到约400—500 Wh·kg^{-1}，并显著提高了吨量级UUV的续航力（如挪威的HUGIN–3000、美国的Echo Ranger[4]）。

近年来，各海洋强国相继推出了中长期海洋新战略和新计划，加快推进高可靠性的长期无人/载人水下观探测与开发装备的研发。例如：美国正在规划建造功能更加强大的长周期通用型深海实验室；俄罗斯针对北冰洋油气开发的长周期水下固定平台需求，制定了水下供能平台、运输平台等多类专用型深海实验室的研制方案等。我国在“十四五”期间也将推动长期载人海底原位实验平台和深海载人移动实验平台的规划建设。这其中，超长时水下供能源技术无疑是瓶颈挑战：一次/二次电池和燃料电池技术，技术成熟，性能可靠，应用广泛，但其供能能力取决于化学能（储

① 本文所用英文缩写：Argo（Array for Real-time Geostrophic Oceanography），地转海洋学实时观测阵列；UUV（Unmanned Underwater Vehicle），无人水下航行器或无人潜航器；AUV（Autonomous Underwater Vehicle），自主式水下航行器或自主水下机器人；ROV（Remote Operated Vehicle），遥控无人潜水器或遥控水下机器人。

② kn（knot），节（1节=1海里/小时=1.852公里/小时）；https://www2.whoi.edu/site/osl/vehicles/remus-100/；https://gdmissionsystems.com/products/underwater-vehicles/bluefin-21-autonomous-underwater -vehicle；http://www.sia.cas.cn/kycg/cgzh/202008/t20200827_5677598.html。

③ http://www.teledynemarine.com/slocum-glider/.

④ http://www.teledynemarine.com/apex-biogeochem?ProductLineID=61.

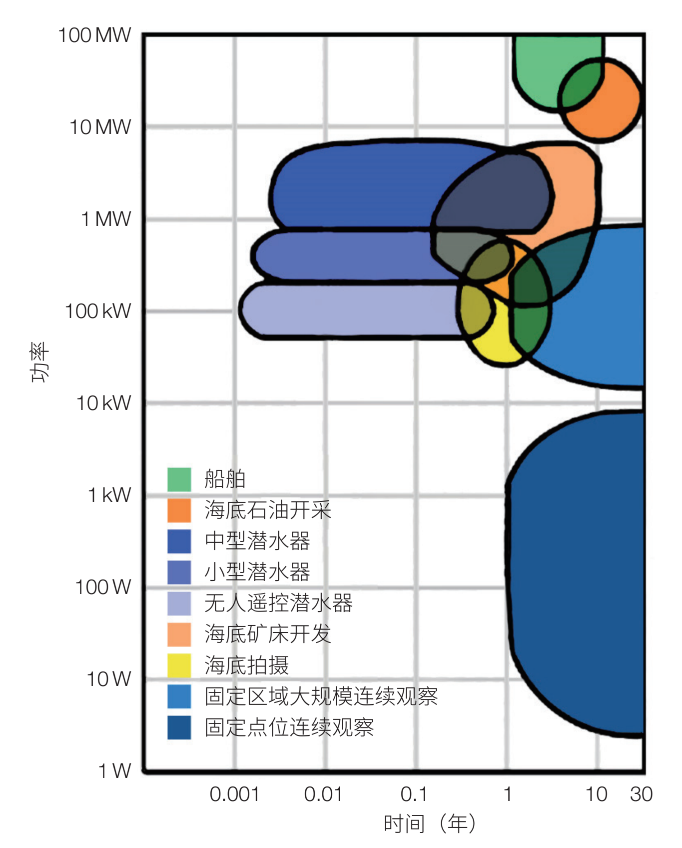


图 1　各种深海活动装备的功率需求

Figure 1　Demand of electric power for activities in deep sea

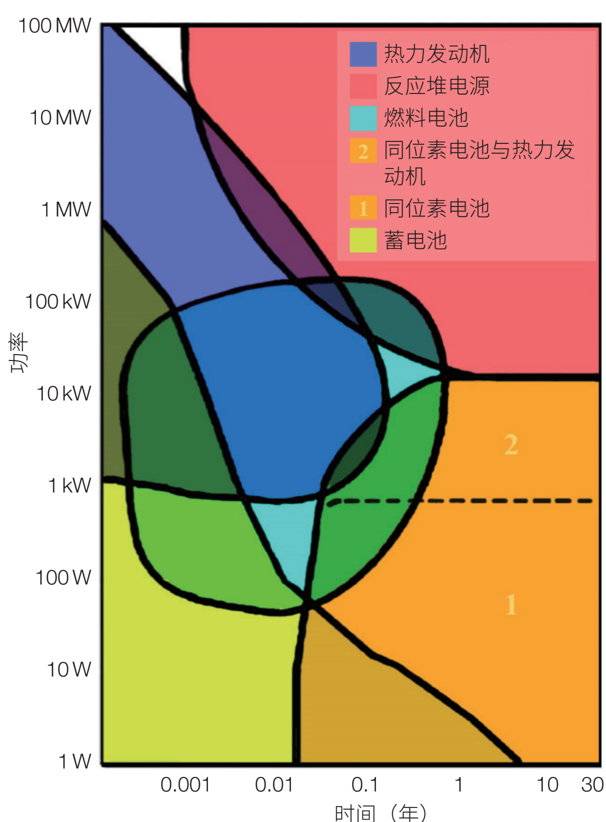


图 2　各种能源的使用范围

Figure 2　Scope of use of various electric power

电材料、燃料与氧化剂）的初始携带量。核能来自核反应过程的能量释放，具有能量密度高的本质特征；同位素电池（或称同位素电源）早在 1974 年即已应用于美国的海洋装备，核反应堆电源也已经成为竞相发展的技术前沿。

2 海洋水下观探测装备核供能技术及其前景

核供能泛指利用核反应所释放的能量来满足热能、电能等能量需求。当前所能利用的核反应主要是放射性同位素的自发核衰变反应和裂变材料的人工核裂变反应，前者的主要利用方式是同位素热源和同位素电池，后者主要是核反应堆[5]。

2.1 同位素电池

同位素电池的核心是放射性同位素材料，其选择需结合装置工作时长、体积与总量限制等实际需求，考虑衰变种类（α 衰变和/或 β 衰变）、半衰期、放射性强度等要素，同时为降低辐射防护成本应尽量选择无伴生高强度或高能 γ 衰变的材料。常用材料有 α 衰变的钋 –210、钚 –238 和 β 衰变的锶 –90 等。放射性同位素材料可从反应堆乏燃料中分离提取，也可通过反应堆或加速器进行定制化生产。

由于放射性同位素的自发衰变属于固有的内禀性质，不受任何外界因素影响。因此，同位素电池具有性能稳定性强、环境适应性强的突出特点，同时其理想寿命只取决于放射性同位素的半衰期。具体而言，同位素电池的特点有：① 寿命长。例如，钚 –238 和锶 –90 的半衰期分别为 87.74±0.04 年和 28.6±0.3 年，其同位素电池设计寿命可达 5—10 年——早期部署的电池实际已服役超过 41 年之久[6]。② 环境适应性强。不依赖阳光或氧化剂，无须添加或更换放射性同位素

材料，环境温度、辐射损伤、海水静压及腐蚀等因素的影响程度只在于同位素电池的外围材料与器部件。③ 易于小型化轻量化。电池结构紧凑，尺寸小、重量轻、功率密度高。采用 α 衰变材料时无需放射性屏蔽措施。美国第一台正式应用的同位素电池仅重 2 kg，提供的电力却相当于 300 kg 的镍–镉电池。④ 可靠性高。同位素电池外壳设计坚固、密封可靠，能经受海水静压力和长期腐蚀等极端环境，并且能抵御机械撞击、爆炸热冲击、高温烧蚀等严酷考验。但是，同位素电池也存在功率较小的弱点，在满足大功率需求时需要结合二次电池等技术。

1913 年英国科学家 Moseley[7]首次提出 β 放射性同位素电池概念，美国于 1956 年制定了“核动力辅助计划”（SNAP）[8]并于 1961 年首次将同位素电池成功应用于空间探测领域[9]。同位素电池技术自此进入快速发展时期，被美国和苏联/俄罗斯广泛部署于空间、海洋、地面等特种装备中。美国自 1974 年起陆续在海底部署了多种 SNAP–21 和 Sentinel–25 同位素电池，建立了海底传感系统和监听网络。俄罗斯在白令海、北极等偏远地区共部署了 1 000 多个锶 –90 同位素电池，用于无人气象站、灯塔、观测站和监听站的电力供应。

我国同位素电池研发长期落后于美国、俄罗斯等国。1971 年 3 月12日，中国科学院原子核研究所（现“中国科学院上海应用物理研究所”）研制成功我国首个同位素电池；该电池采用钋 –210 衰变源，电功率 1.4 W，热电转换效率 4.2%，填补了国内空白[10]。2006 年，中国原子能科学研究院牵头研制成功了百毫瓦级的钚 –238 同位素电池[11]。这类技术随后被应用在嫦娥三号（2013 年，同位素热源）[12]和嫦娥四号（2019 年，同位素电源）[13]的探测器。目前，受强烈的需求驱动，国内已有多个高校和研究所正在开展相关研究并取得了可喜的成果。

2.2 反应堆电源

顾名思义，反应堆电源就是将核反应堆内自持核裂变反应产生的热能转换为电能的装置，通常由反应堆本体、辐射屏蔽体、热电转换系统、废热排放系统和自动控制系统等部分组成：反应堆本体内核裂变反应产生的热能被传输到热电转换系统后，一部分热能被转换为电能，其余热能则可用于装备热平衡管理或由废热排放系统释放到环境海水中；辐射屏蔽体位于反应堆本体与装备其他组成（包括乘员）之间以降低辐射剂量至安全水平；自动控制系统负责整个反应堆电源系统的监测与运行控制。

与常规的电源相比，反应堆电源具有能量密度高、持续高功率输出能力强、功率可调范围大、外界物质依赖性低（无需氧化剂和核燃料储备等）等特点，可显著提高水下观探测装备的自持力、续航力、机动性、隐蔽性等综合能力。

按中子能谱，反应堆电源可分为热中子堆、超热中子堆和快中子堆。采用快中子能谱能够把铀 –238 增殖转换为核燃料钚 –239，可实现不换料供能寿命与装备同寿期。

按冷却方式，反应堆电源可分为气体冷却堆、液态冷却堆和热管冷却堆。气体冷却堆，技术成熟度高；但由于气体的热导和热容相比液态金属、水等常用液态冷却剂小很多，要做到同等比能量或比功率的难度极大。因此，气体冷却堆较为适用于陆上固定式供能场景。液态冷却堆，堆芯换热能力强，大功率（>10 MW_e）情况具有轻量小型的优势（如铅基堆）；但通常需要配置冷却剂强迫循环泵，会带来一定的振动、噪声和惯性矢量等问题。热管冷却堆，具有可靠性高、不依赖辅助系统、动态响应特性好、静默运行等优势。尤其是小功率（<1 MW_e）情况下的固态耦合热应力和装配工艺问题较小，且水下环境天然存在着几乎无限大的海水冷源，通过合理设计发挥这一优势的潜力极大[14]。热管冷却堆在航天领域已经得到国内外的广泛研究。例如：美国的 HOMER 系列热管冷却堆，采用

高富集度铀燃料，钠钾热管冷却，斯特林循环发电，电功率可达 25 kW，热电转换效率可达 20%；MSR 锂热管冷却堆，电功率为百千瓦量级，堆外热离子转换发电，热电转换效率大于 10%；SAIRS 和 LEGO–LRCS 钠热管冷却快堆，分别采用碱金属热电转换和斯特林循环发电，电功率分别为约 100 kW 和 30 kW。在我国，中国原子能科学研究院也研究提出了多种可用于航天任务的热管堆设计方案，如火星表面堆、月表核电站等。

2.3 核能到电能的转换技术

同位素电池和反应堆电源均需要把核反应释放的能量转换为电能，转换效率是最核心的指标。换能方式按工作原理可分为热转换型和非热转换型，按结构特征可分为静态型和动态型（图 3）。

非热转换型是将核反应所释放的粒子的动能直接或经次级效应转换成电能，典型如 β 射线（即电子）直接收集利用。热转换型则是以热能为中介将核能转换为电能，典型如利用塞贝克（Seeback）效应的温差发电。

静态型和动态型的分类则主要依据换能系统中是否使用运动部件，如：动态型朗肯循环和布雷顿循环均使用叶轮机械，以及斯特林循环使用往复式机械等。动态型能量转换方式[15,16]在地面应用的技术成熟度很高，能量转换效率也较高，但应用于移动式水下观探测装备时或将带来姿态控制和振动隔离的额外要求，因此更适合于固定式装备；同时，针对水下特殊环境，小型化、紧凑式的整体设计和全寿期的可靠性要求也极为严苛。

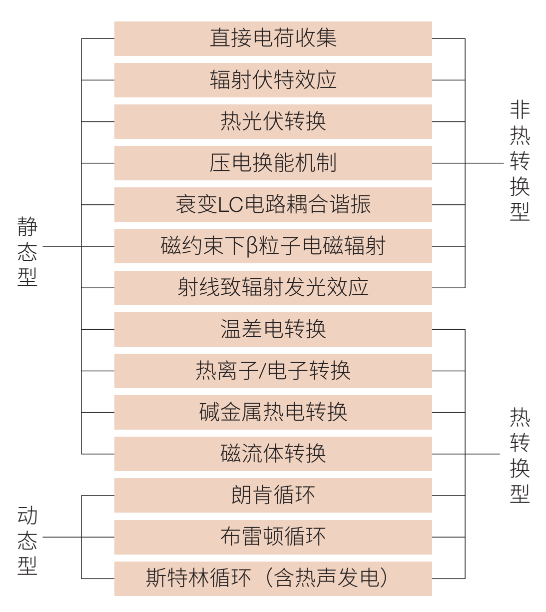


图 3 核能到电能的各种转换方式

Figure 3 Various approaches of converting nuclear energy to electricity

静态型能量转换方式虽然在能量转换效率上并无优势甚至不够理想，但没有运动部件的特点带来了系统可靠性高、密封性好、模块化设计潜力大、相对尺寸小/重量轻等诸多宝贵优点；此外，还具有负载跟随特性好等特点。因此，静态型能量转换方式是海洋水下观探测装备核供能系统优先考虑的能量转换方式。

各种转换方式的具体工作原理[17-26]在此不再赘述。值得指出的是，为追求更高能量转换效率，适用于更高热源温度（＞1 000 K）的辐射伏特效应[27-30]、热光伏发电[31-34]、碱金属热电转换[35]、磁流体发电[36]等新技术得到了大量的研究。

2.4 涉核安全问题

核安全问题是核供能系统必须面对的特有问题，是水下观探测装备采用核供能的核心和基础。由于水下观探测装备在体积、重量方面的强约束，在设计上难以做到使其拥有足够的安全冗余；同时，其装备的全生命周期会经历陆上装调、部署服役、回收处置等多个阶段，特别是全球四大洋水体连通，洋流循环，一旦发生核泄漏事故造成海洋核污染，其影响必将超出一域一国，其后果也将由全人类共同承担[37,38]。

国际法方面，除《联合国海洋法公约》普适各国各类海洋活动外，迄今为止还没有一部专门针对海洋核污染问题的国际公约；现有的国际海洋环境法律体系中存在对海上核污染专门调整的法律空白，现有的国际民用核能法律制度和国际法实践在海上核污染法律责任方面均存在缺陷[39]，须依赖国际原子能机构的

相关制度[40]。

鉴于涉核的特殊敏感性，以及核安全事故的广域性、长期性和灾难性，我国作为负责任的大国和联合国“五常”，必须高度重视、系统应对水下观探测装备核供能的核安全问题，必须着眼核供能系统的全生命周期管控。除现行核安全管理体系适用的环节和内容之外，还必须研究和解决海洋水下这一新应用场景下的核安全新问题。

2.5 水下观探测装备的核供能适用性

综上所述，根据核供能技术及其热电转换技术的技术特点与成熟度情况，从寿命角度核供能无疑更适合于单次长时甚至超长时工作的水下装备，从功率角度则可定性小结为：① 千瓦级以下的核供能系统，适用于微型、小型的固定式、移动式水下观探测装备，可采用同位素核热源与静态热电转换技术；② 千瓦级的核供能系统，适用于小型的移动式水下观探测装备和中型的固定式水下观探测装备（如长航程 AUV 等），采用同位素或反应堆核热源与静态或动态热电转换技术，须结合装备的体积重量约束和工作时长要求综合考量；③ 10 千瓦级及以上的核供能系统，适用于中大型移动式和大型固定式水下观探测装备（如大型 UUV、ROV、载人深潜器、深海实验室等），宜采用反应堆核热源与动态热电转换技术。

必须强调的是，除了成本因素，核安全是核供能应用于水下观探测装备的强约束条件；以上关于适用性的定性分析，也必须以妥善解决相关和安全问题为前提。因此，从装备场景角度看，应用于深远海空间深度利用、海洋资源开发的超大潜深、超长航程（如大洋尺度甚至全球尺度）的移动式无人观探测装备，以及大中型固定式有人/无人观探测装备（如深海实验室等）或平台（如水下供能基站、水下工程作业平台等），将更能充分地发挥核供能的不可替代性优势，成为其闪耀的舞台。

3 思考与建议

海洋，事关国家民族现实利益，事关全人类共同命运。2022 年 4 月，习近平总书记在视察海南时强调，“建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务。要推动海洋科技实现高水平自立自强，加强原创性、引领性科技攻关，把装备制造牢牢抓在自己手里”。核供能应用于水下观探测装备，在某些特殊应用场景下有着不可替代性优势，也存在着亟待研究和解决的基础科学问题和关键核心技术。基于国际国内现状，面向未来发展，提出 4 个方面的建议。

（1）重点发展放射性同位素制备和分离技术，建设专用加速器制备与热室分离设施平台。放射性同位素主要通过反应堆辐照、加速器辐照和高放废液提取 3 种方式制备。目前，我国仅有 5 座可生产放射性同位素的非专用反应堆，但它们可制备的放射性同位素种类和产量均非常有限，尚不能满足国内医疗等同位素市场的需求。乏燃料后处理过程中可大量提取放射性同位素，经济性好，但我国目前尚未形成规模化的乏燃料后处理能力，应予以优先发展。加速器方面，我国已建成 2 台 30 MeV 专用加速器和 1 台 100 MeV 医用同位素生产装置，但缺乏放射性同位素分离和组装等流程所必需的大型热室配套，因此尚不具备量产能力。

（2）重点发展个性化特种反应堆技术，建设多用途零功率装置、数字反应堆模拟装置、高通量广谱中子辐照平台等共性研发平台。我国目前的反应堆研发平台基本由核电企业根据大型商用核动力堆的堆型而建设，缺乏功能灵活、通用性强的共性研发平台。模块化的多用途通用型零功率物理实验平台，不仅是适应不同设计特征的微小型核反应堆（如热管堆、铅基堆、熔盐堆）研制的需要，也是特殊水下应用场景的自主测控与运行技术研发测试的需要。基于高精度模

拟程序和大数据分析技术，开发高度集成的、多物理耦合的数字核电源模拟装置，可全方位、全寿期模拟/预测核电源的性能参数和安全特性，加快提升技术成熟度。先进加速器驱动的高通量（约 $10^{16}\ n\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$）广谱中子辐照平台可大幅度缩短个性化特种反应堆所需新型核燃料（更高的能量密度、物态稳定性、放射性包容能力）的研发周期。

（3）重点支持热电转换技术研究。热电转换技术是水下观探测、空间探测等场景下应用核供能的核心关键技术，美欧发达国家已经开展了大量研究并取得了显著进展。我国在这一领域的研究组织性不够，研究水平上的差距明显，应加大组织力度，支持高效、稳定的静态转换技术（如碱金属热电转换技术、热光伏转换技术等），紧凑、可靠的动态转换技术（如超临界二氧化碳循环、热声发电技术等），以及耦合应用技术的创新研究和验证。

（4）重点支持水下特殊应用场景下的核安全问题研究。包括但不限于：① 制定水下观探测装备核供能系统的核安全设计准则与审评导则，推动海洋极端意外情况下安全指标及其试验验证方法的确定等；② 服役过程中核供能系统全自主状态监测、故障诊断、事故容错、运行控制的技术可靠性；③ 服役过程中事故工况下核供能系统的安全应急技术，以确保在发生外力撞击、电力失效、超限下沉等意外事故时核材料的完整包容和核热的充分导出，不致发生放射性泄漏；④ 服役过程中切实有效的核材料实物保护，确保核材料被有意（如有预谋的盗抢）或无意（如捕鱼时误捞）获取而致扩散的风险足够小，以及确保核材料一旦失去管控的应急措施足够及时和有效。

致谢　感谢中国科学院院部詹文龙、中国科学院沈阳自动化研究所李硕和中国科学院重大科技任务局吴园涛在本文酝酿策划与成稿过程中所给予的重要指导；感谢中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所何梅生、余大利、汪振等协助收集整理相关资料。

参考文献

1 Otsubo A, Takahashi M. Design study of PbBi- and NaK-cooled small deep sea fast reactors. Progress in Nuclear Energy, 2005, 47(1/4): 202-211.

2 冯景祥, 姚尧, 潘峰, 等. 国外水下无人装备研究现状及发展趋势. 舰船科学技术, 2021, 43(23): 1-8.
Feng J X, Yao Y, Pan F, et al. Existence and development trend of underwater unmanned equipment in foreign countries. Ship Science and Technology, 2021, 43(23): 1-8. (in Chinese)

3 杨波, 刘烨瑶, 廖佳伟. 载人潜水器——面向深海科考和海洋资源开发利用的“国之重器”. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 622-631.
Yang B, Liu Y Y, Liao J W. Manned submersibles—Deep-sea scientific research and exploitation of marine resources. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 622-631. (in Chinese)

4 钱东, 唐献平, 赵江. UUV技术发展与系统设计综述. 鱼雷技术, 2014, 22(6): 401-414.
Qian D, Tang X P, Zhao J. Overview of technology development and system design of UUVs. Torpedo Technology, 2014, 22(6): 401-414. (in Chinese)

5 朱安文, 刘磊, 马世俊, 等. 空间核动力在深空探测中的应用及发展综述. 深空探测学报, 2017, 4(5): 397-404.
Zhu A W, Liu L, Ma S J, et al. An overview of the use and development of nuclear power system in deep space exploration. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 397-404. (in Chinese)

6 Brainard J. Voyager 2 heads for the stars. Science, 2018, 362: 1220.

7 Moseley H. The attainment of high potentials by the use of Radium. Proceedings of the Royal Society. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1913, 88: 471-476.

8 Tonelli A D, Secord T C. Auxiliary power generating system for a large space laboratory. Progress in Astronautics and Rocketry, 1966, 16: 299-322.

9 Furlong R R, Wahlquist E J. U.S. space missions using radioisotope power systems. Nuclear News, 1999, 42: 26-34.

10 黛芥祖. ^{210}Po放射性同位素电池. 核技术, 1980, 3(5): 8-13.
Dai J Z. ^{210}Po radioisotope power generator. Nuclear Techniques, 1980, 3(5): 8-13. (in Chinese)

11 罗志福, 蔡善钰, 何舜尧, 等. 百毫瓦级钚-238放射性同位素电池的研制. 中国原子能科学研究院年报, 2006, (1): 261.
Luo Z F, Cai S Y, He S Y, et al. Development of 100 MW plutonium-238 radioisotope battery. Annual Report of China Institute Atomic Energy, 2006, (1): 261. (in Chinese)

12 苗建印, 何江, 张红星. 月球探测器月夜生存热控技术及展望. 中国航天, 2015, (11): 14-18.
Miao J Y, He J, Zhang H X. Thermal control technology and prospect of lunar probe's moonlit survival. Aerospace China, 2015(11): 14-18. (in Chinese)

13 彭磊, 侯旭峰, 阎勇, 等. 嫦娥四号着陆器同位素温差电池设计与验证. 电源技术, 2020, 44(4): 607-612.
Peng L, Hou X F, Yan Y, et al. Design and verification of radioisotope thermoelectric generator for Chang'e-4 lander. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(4): 607-612. (in Chinese)

14 孙浩, 王成龙, 刘逍, 等. 水下航行器微型核电源堆芯设计. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 646-651.
Sun H, Wang C L, Liu X, et al. Reactor core design of micro nuclear power source applied for underwater vehicle. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(4): 646-651. (in Chinese)

15 Breedlove J J, Zagarola M V, Nellis G F, et al. Life and reliability characteristics of turbo-Brayton coolers// Ross R G. Cryocoolers 11. Boston: Springer US, 2002: 489-497.

16 Zagarola M V, Izenson M G, Breedlove J J, et al. An advanced turbo-Brayton converter for radioisotope power systems. AIP Conference Proceedings, 2005, 746(1): 632-640.

17 王心亮, 段宗武, 陈虹. 核能利用中的静态能量转换技术. 舰船科学技术, 2011, 33(8): 140-144.
Wang X L, Duan Z W, Chen H. Prospects of static energy conversion technology for nuclear power application. Ship Science and Technology, 2011, 33(8): 140-144. (in Chinese)

18 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究. 中国科学： 技术科学, 2019, 49(1): 1-12.
Wu W R, Liu J Z, Zhao X J, et al. System engineering research and application foreground of space nuclear reactor power generators. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(1): 1-12. (in Chinese)

19 牛厂磊, 罗志福, 雷英俊, 等. 深空探测先进电源技术综述. 深空探测学报, 2020, 7(1): 24-34.
Niu C L, Luo Z F, Lei Y J, et al. Advanced power source technology of deep space exploration. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 24-34. (in Chinese)

20 钟武烨, 赵守智, 郑剑平, 等. 空间热离子能量转换技术发展综述. 深空探测学报, 2020, 7(1): 47-60.
Zhong W Y, Zhao S Z, Zheng J P, et al. A review of technology development of thermionic energy conversion for space application. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 47-60. (in Chinese)

21 王傲, 申凤阳, 胡古, 等. 热管空间核反应堆电源的研究进展. 核技术, 2020, 43(6): 9-15.
Wang A, Shen F Y, Hu G, et al. A survey of heatpipe space nuclear reactor power supply. Nuclear Techniques, 2020, 43(6): 9-15. (in Chinese)

22 Li H, Lal A, Blanchard J, et al. Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever. Journal of Applied Physics, 2002, 92(2): 1122-1127.

23 Zhou Y, Zhang S X, Li G P. A kind of dynamic radioisotope batteries based on PZT and its preparing method: PRC, 105427913A, 2016-03-29.

24 Polu M B. Direct conversion from radioisotope energy to electric energy device: PRC, 87103077A, 1987-11-04.

25 Bower K E, Barbanel Y A, Shreter Y G, et al. Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries. Boca Raton: CRC Press, 2002.

26 Xu Z H, Tang X B, Hong L, et al. Development of a beta radioluminescence nuclear battery. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(4): 81-86.

27 Sun W, Kherani N P, Hirschman K D, et al. A three-dimensional porous silicon p-n diode for betavoltaics and photovoltaics. Advanced Materials, 2005, 17(10): 1230-1233.

28 Lu M, Zhang G G, Fu K, et al. Gallium Nitride Schottky betavoltaic nuclear batteries. Energy Conversion and

Management, 2011, 52(4): 1955-1958.

29 Olsen L C, Cabauy P, Elkind B J. Betavoltaic power sources. Physics Today, 2012, 65(12): 35-38.

30 刘本建, 张森, 郝晓斌, 等. 金刚石辐射伏特效应同位素电池器件研究进展. 人工晶体学报, 2022, 51(5): 801-813.
Liu B J, Zhang S, Hao X B, et al. Research progress on diamond radio-voltaic effect isotope batteries devices. Journal of Synthetic Crystals, 2022, 51(5): 801-813. (in Chinese)

31 Schock A, Mukunda M, Or C, et al. Design, analysis, and optimization of a radioisotope thermophotovoltaic (RTPV) generator, and its applicability to an illustrative space mission. Acta Astronautica, 1995, 37: 21-57.

32 Schock A, Mukunda M, Or C, et al. Analysis, optimization, and assessment of radioisotope thermophotovoltaic system design for an illustrative space mission. AIP Conference Proceedings, 1995, 321(1): 331-356.

33 乔在祥, 陈文浚, 杜邵梅. 热光伏技术的研究进展. 电源技术, 2005, 29(1): 57-61.
Qiao Z X, Chen W J, Du S M. Recent development of thermophotovoltaic technologies. Chinese Journal of Power Sources, 2005, 29(1): 57-61. (in Chinese)

34 Datas A, Martí A. Thermophotovoltaic energy in space applications: Review and future potential. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 285-296.

35 王磊, 樊志民, 隋鑫, 等. 碱金属热电转换器的原理及其应用. 船电技术, 2020, 40(7): 6-10.
Wang L, Fan Z M, Sui X, et al. Principle and application of alkali metal thermoelectric converter. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(7): 6-10. (in Chinese)

36 刘飞标, 朱安文, 唐玉华. 磁流体发电系统在空间电源中的应用研究. 航天器工程, 2015, 24(1): 111-119.
Liu F B, Zhu A W, Tang Y H. Research on MHD power generation system in space electrical power application. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1): 111-119. (in Chinese)

37 郭皓, 杜金秋. 海洋核污染与核素迁移. 海洋开发与管理, 2014, 31(7): 83-86.
Guo Hao, Du J Q. Marine nuclear pollution and nuclide migration. Ocean Development and Management, 2014, 7: 83-86. (in Chinese)

38 江伟钰. 论21世纪核使用和全球和平与安全的国际法责任确定——暨《不扩散核武器公约》35周年确定. 华东理工大学学报（社会科学版）, 2005, 20(2): 93-98.
Jiang W Y. On the nuclear usage and the international legal liability decision of world peace and security. Social Sciences Journal of Ecust, 2005, 20(2): 93-98. (in Chinese)

39 段小松. 论国际海上核污染法律制度的完善——以日本海上核污染为例. 特区经济, 2011, (10): 249-251.
Duan X S. international sea nuclear pollution legal system's perfection—Take Japan nuclear pollution on sea as example. Special Zone Economy, 2011, (10): 249-251. (in Chinese)

40 Mohamed EIBaradei, Edwin Nwogugu, John Rames. 国际法和核能：法律框架概述. 国际原子能机构通报, 1995, 36(3): 16-25.
EIBaradei M, Nwogugu E, Rames J. International law and nuclear energy: An overview of the legal framework. IAEA Bulletin, 1995, 36(3): 16-25. (in Chinese)

Thinking on Nuclear Energy Supply Scheme for Underwater Observation and Exploration Equipment

PENG Zilong[1*] YAN Shuxue[2] YIN Jianping[3] YANG Lei[4] CAI Xiangzhou[5] YU Jie[6]
（1 Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341119, China;
2 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
3 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;
4 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
5 Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
6 Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ）

Abstract The ocean is essential to country's strategic interests and common destiny of mankind, and therefore equipment of various kinds is urgently needed for all-around and multi-dimensional ocean observation and exploration. This article brief introduced the two technological approaches of nuclear energy supply for underwater observation and exploration equipment and relevant exchange technologies of nuclear heat to electric power, quantitatively summarized the applicability of nuclear energy supply on all kinds of equipment, discussed the nuclear safety issues thereon, and then recommended that the technology research of radioisotope fabrication and separation and the construction of relevant facility, the development of individual reactor and the construction of relevant common facility, the technology research of thermoelectric conversion, and the research of relevant nuclear safety issues, should be special supported.

Keywords ocean, observation and exploration equipment, nuclear energy, nuclear safety



彭子龙 中国科学院赣江创新研究院副研究员，博士。先后在中国科学院物理研究所、基础科学局、重大科技任务局工作20多年。长期负责材料和能源领域发展战略研究，以及中国科学院战略性先导科技专项、国家科技重大专项等的管理；全程深度参与了“加速器驱动次临界嬗变系统（ADS）”和“钍基熔盐堆核能系统（TMSR）”等中国科学院战略性先导科技专项的组织与实施，在大科学装置建设、先进核能、关键材料等重点领域撰写和发表了多篇战略咨询报告和科技管理论文。 E-mail: zlpeng@gia.cas.cn

PENG Zilong Ph.D., Associate Research Fellow in the Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences (CAS). Dr. PENG has worked in the Institute of Physics, the Bureau of Basic Science and the Bureau of Major R&D Programs in CAS for more than 20 years, where he was responsible for the research of development strategy and the management of the Strategic Priority Research Program (SPRP) of CAS and the National Science and Technology Major Program related to the field of material and energy, deeply involved in the organization and implementation of the two SPRPs, "Accelerator Driven Sub-critical Transmutation System" and "Thorium based molten salt reactor nuclear power system". In the fields of the Large-scale Scientific Facility, advanced nuclear energy and the critical materials, Dr. PENG has written and published several strategic consulting reports and papers in sci-tech management. E-mail: zlpeng@gia.cas.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author